



Salda Gölü Mikrobiyalitlerine Dair Yeni Bulgular ve Astrojeolojik Önemleri
(Burdur, GB-Türkiye)
New findings about the Lake Salda Microbialites and Their Astrogeological Significance
(Burdur, SW-Türkiye)

Nurgül Balcı

*İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü,
Jeomikrobiyoloji-Biyojeokimya Laboratuvarı, Ayazağa Yerleşkesi, 34469, İstanbul*

• Geliş/Received: 20.03.2025 • Düzeltilmiş Metin Geliş/Revised Manuscript Received: 21.06.2025 • Kabul/Accepted: 23.06.2025
• Çevrimiçi Yayın/Available online: 17.08.2025 • Baskı/Printed: 31.08.2025

Araştırma Makalesi/Research Article

Türkiye Jeol. Bül. / Geol. Bull. Turkey

Öz: Salda Gölü’nde (Güney Batı Anadolu) sulu magnezyum karbonat (SMK) içerikli güncel mikrobiyalitler, kıyı şeridi boyunca ve 15 m su derinliğine kadar uzanan, birkaç cm büyüklüğünden yaklaşık 10 m yüksekliğe ve 3-4 m genişliğe kadar varan yapılar şeklinde oluşmaya devam etmektedir. Sunulan çalışma kapsamında, ilk defa bu organo-sedimanter yapıların, morfolojileri, sedimentolojik ve dokusal özellikleri ortaya konulmuş; türlerine göre sınıflandırılmış ve göldeki mekansal dağılımları haritalanmıştır. Bu kapsamda gölün litoral kısmında 5 farklı mikrobiyalit zonu belirlenmiştir. Göldeki, stromatolitik-trombolitler en baskın mikrobiyalit türüdür ve gölün belirli kısımlarında tayin edilmişlerdir. Stromatolitik-trombolitler, genellikle kubbemsi ve karnabahar; nadiren tabular (yassı) olmak üzere çok çeşitli makro morfolojiye sahiptir. Orta ölçekte (cm), stromatolitik-trombolitler parmak şekilli (2-5 cm) laminalı mini sütunlar, yumru şekilli dendritik ve soğanimsi büyüme yapıları sergiler. Karnabahar morfolojisine sahip trombolitler birleşerek derinlerde (10-20 m) resif benzeri geniş bir yapı oluşturmaktadırlar. Stromatolitik ve dendritik iç yapıları mikrobiyalitler gölün belirli zonları ile sınırlıdır (Zon 2, 3). Mikrobiyalitlerin, makro boyuttaki dış morfolojisi, öncelikle hakim çevresel koşulların etkisi altında şekillenmektedir. Gölün su seviyesindeki mevsimsel dalgalanmalar, sedimantasyon oranlarındaki bölgesel farklılıklar, hakim rüzgar ve akıntılar depolanma ortamını kontrol eden başlıca faktörlerdir. Mikrobiyalitlerin iç büyüme yapısı, mikrobiyal topluluk yapısı ile çökme ortamının koşullarına bağlıdır. Mikrobiyal tabakada yapılan mineralojik çalışma ile, ilk defa hücre dışı polimerik madde (HPM) ile yakından ilişkili farklı bir SMK minerali olan dipinjit minerali ($Mg_5(CO_3)_4 \cdot OH_2 \cdot 5H_2O$) tespit edilmiştir. Mikrobiyalitlerin petrografik incelemeleri, karbonatlar içinde bol miktarda dikey ve dikeye yakın konuma sahip filament (mineralize?) benzeri yapıların varlığını ortaya koymuştur. Nodüler aragonitler genellikle mikrobiyal tabakalarla ilişkili iken, boşluklarda gelişen lifler ve bunların bir araya gelmesi ile oluşan aragonit yelpazeleri, izopak saçaklar göldeki ikincil ve abiyotik karbonat çökmesine işaret etmektedir. Morfolojik, mineralojik ve dokusal çeşitlilikleri nedeniyle Salda Gölü mikrobiyalitleri hem jeolojik kayıtlardaki Mg-karbonatların hem de Mars kraterlerinden biri olan Jezero Krateri’ndeki paleogölde tespit edilen SMK’ların kökeni ve oluşum süreçlerini ortaya koymak için potansiyel modern bir analogdur. Bu çalışmada, Salda Gölü mikrobiyalitlerinin kökenleri, oluşum mekanizmaları ve biyoiz koruma potansiyeli elde edilen yeni veriler ışığında, değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Biyoiz, Dipinjit, GB-Türkiye, Mars, Salda Gölü, sulu magnezyum karbonat.

Abstract: In Lake Salda (Southwestern, Türkiye), modern microbialites containing hydrated Mg carbonates continue to form on the shoreline of the lake and at 15 m water depth in structures ranging from a few cm in size to about 10 m in height with 3-4 m width. For the first time, these organo-sedimentary structures were classified and their

morphotypes, sedimentological and textural characteristics along with their spatial distribution in the lake were identified. In this context, 5 different zones were identified in the lake. In the lake, stromatolitic thrombolites are the most dominant microbialite type, while stromatolites and thrombolites are restricted to certain parts of the lake. Stromatolitic thrombolites have a wide variety of morphologies, usually dome-shaped and cauliflower-like, while they are rarely tabular. On a meso-scale (cm), stromatolitic thrombolites exhibit finger-shaped (2-5 cm) laminated mini-columns, and dendritic, and bulbous growth structures. Thrombolites with cauliflower morphology coalesce to form a large reef-like structure at depth (10-20 m). Thrombolites with stromatolitic laminae and dendritic internal structure are limited to certain zones in the lake (Zone 2, 3). The macro-scale external morphology of the microbialites is shaped primarily by the influence of the prevailing environmental conditions. Seasonal fluctuations in lake water level, regional differences in sedimentation rates, prevailing winds and currents are the main factors controlling the depositional environment. The internal growth structure of microbialites depends on the microbial community structure and the conditions of the depositional environment. Mineralogical study of the microbial layer revealed a different hydrated Mg carbonate mineral, dypingite ($Mg_5(CO_3)_4(OH)_2 \cdot 5H_2O$), for the first time. This mineral, closely related to extracellular polymeric matter (EPS), is the precursor of hydromagnesite. Petrographic investigations of the microbialites revealed the presence of abundant vertical and near-vertical filament (mineralised?)-like structures associated with carbonates, exhibiting a clotted texture containing peloids of various sizes in addition to a thin lamination. Nodular aragonites are generally associated with microbial layers, while fibres developed in voids and aragonite fans and isopach fringes formed by their aggregation indicate secondary and abiotic carbonate precipitation in the lake. Due to their structural, mineralogical and compositional diversity, Lake Salda microbialites are a potential modern analogue that may reveal the origin and formation processes of both Mg-carbonates in the geological record and hydrated Mg-carbonates detected in a possible palaeolake in Jezero crater, one of the Martian craters. In this study, new data on Lake Salda microbialites is evaluated in terms of their origin, formation mechanism and potential for biosignatures.

Keywords: Biosignature, Dypingite, hydrated magnesium carbonates, SW Türkiye, Mars, Lake Salda.

GİRİŞ

Fiziksel, kimyasal ve biyolojik süreçlerin etkileşimiyle oluşan mikrobiyalitler, Arkeen'den günümüze kadar farklı jeokimyasal ortamlarda oluşan karbonatlı organo-sedimanter yapılarıdır (Reid vd., 1995; Ferris vd., 1997; Allwood vd., 2006; Andersen vd., 2011; Burne vd., 2014; Frantz vd., 2015; Chagas vd., 2016). Bu bağlı, taşlaşmış, organo-sedimanter yapıların, Yerküre'deki en eski yaşam formu olduğu ve 3 milyar yıldan daha uzun bir tortul kayda sahip olduğu düşünülmektedir (Awramik ve Margulis, 1974; Allwood vd., 2006; Van Kranendonk vd., 2008). En eski bu makro fosillerin içerdikleri jeokimyasal kayıtların deşifre edilerek yeniden yapılandırılması, öncelikle benzer güncel oluşumların anlaşılmasına bağlıdır.

Güncel mikrobiyalitler tatlı su dereleri ve göllerinden, alkali göllere, kaplıcalara (Brasier vd., 2015, 2018; De Boever vd., 2017a, ve b) ve krater göllerine (Kempe ve Kaźmierczak, 1993; Arp vd.,

2003) kadar çok çeşitli jeokimyasal ortamlarda oluşmaktadırlar. Mikrobiyalitler, oluştukları farklı ortamların jeokimyasal, mikrobiyolojik ve fizikokimyasal özelliklerini yansıtan birer arşiv özelliği taşımaktadırlar. Jeolojik kayıtlarda ki mikrobiyalitlerin sedimentolojik, jeokimyasal ve mikropaleontolojik özelliklerini derleyen kapsamlı çalışmalara rağmen, bu kayaçların kökenine ilişkin tartışmalar halen devam etmektedir (Grotzinger ve Rothman, 1996; Grotzinger ve Knoll, 1999; Corsetti ve Storrie-Lombardi, 2003; Allwood vd., 2006). Mikrobiyalitler üzerinde yapılan son çalışmalar, bu yapıların oluşumunun ve morfolojisinin farklı ölçeklerde gelişen biyolojik ve çevresel etkilerle yakından bağlantılı olduğunu göstermiştir (Ginsburg, 1991; Gomez, vd., 2014; Chagas vd., 2016). Güncel mikrobiyalitler üzerinde yürütülen mikrobiyal çeşitlilik, sedimanter yapı analizi ve izotopik bileşimlerle ilgili çalışmalar farklı metabolik reaksiyonların bu yapıların oluşmasına doğrudan veya dolaylı

olarak katkıda bulunduğunu ortaya koymuştur. Örneğin, oksijenik ve anoksijenik fotosentezin yanısıra, çeşitli karbon fiksasyon süreçleri ile sülfür metabolizmasının (Riding, 2006; Wacey vd., 2011) mikrobiyalitlerde karbonat oluşumuna neden olduğu öne sürülmüştür. Söz konusu bu mikrobiyal süreçlerin yanısıra, abiyojenik faktörlerin de bu oluşumlara katkısı farklı çalışmalarda ortaya konmuştur. Örneğin, Arp vd. (2001), oksijenik fotosentezin alkali ortamlarda her zaman karbonat çökelimine neden olmadığını göstermiştir. Aloisi (2008) ve Meister (2013; 2014) yaptıkları çalışmalarda kabul görülen aksine, mikrobiyal sülfat indirgenmesinin her zaman karbonat oluşumunu tetiklemediğini göstermişlerdir. Tüm bu kapsamlı araştırmalara rağmen, mikrobiyalitlerin oluşmasında ve gelişmesinde etkili biyotik ve abiyotik süreçlerin neler olduğu; daha da önemlisi, bu süreçlerle ilişkili biyoizlerin jeolojik kayıtlarda ne ölçüde korunduğu ve nasıl deşifre edileceği konusunda ki bilgilerimiz hala sınırlıdır.

Denizel ortamlarda gelişen benzerlerine oranla, çok çeşitli su kimyasına (örn. tatlı, tuzlu, alkali, sıcak su kaynakları gibi) sahip karasal sularda -özellikle gölssel- oluşan mikrobiyalitler, bu farklı jeokimyasal ortamları arşivleme potansiyeline sahiptirler. Bu nedenle hem güncel hem de eski gölssel kökenli mikrobiyalitler (örn., Tumbiana Formasyonu, 2,7Ga; Schopf, 2006; Awramik ve Buchheim, 2009) içerdikleri geniş jeokimyasal kayıtlar nedeni ile astrobiyoloji çalışmalarının merkezinde yer almaktadırlar (Gerard vd., 2013; 2018; Horgan vd., 2020).

Güncel, sulu Mg-karbonatlı (SMK) mikrobiyalitler, Salda Gölü'nün sığ kıyı şeridi boyunca ve daha derinlerde aktif olarak gelişmektedir. Bu karbonatlar, ilk olarak Braithwaite ve Zedef (1994, 1996) tarafından belgelenmiş, tüm yapılar stromatolit olarak adlandırılmış; oluşumları genel olarak fotosentetik aktiviteye bağlanmıştır (Russell vd., 1999; Kazancı vd., 2004). Balcı vd. (2018, 2020),

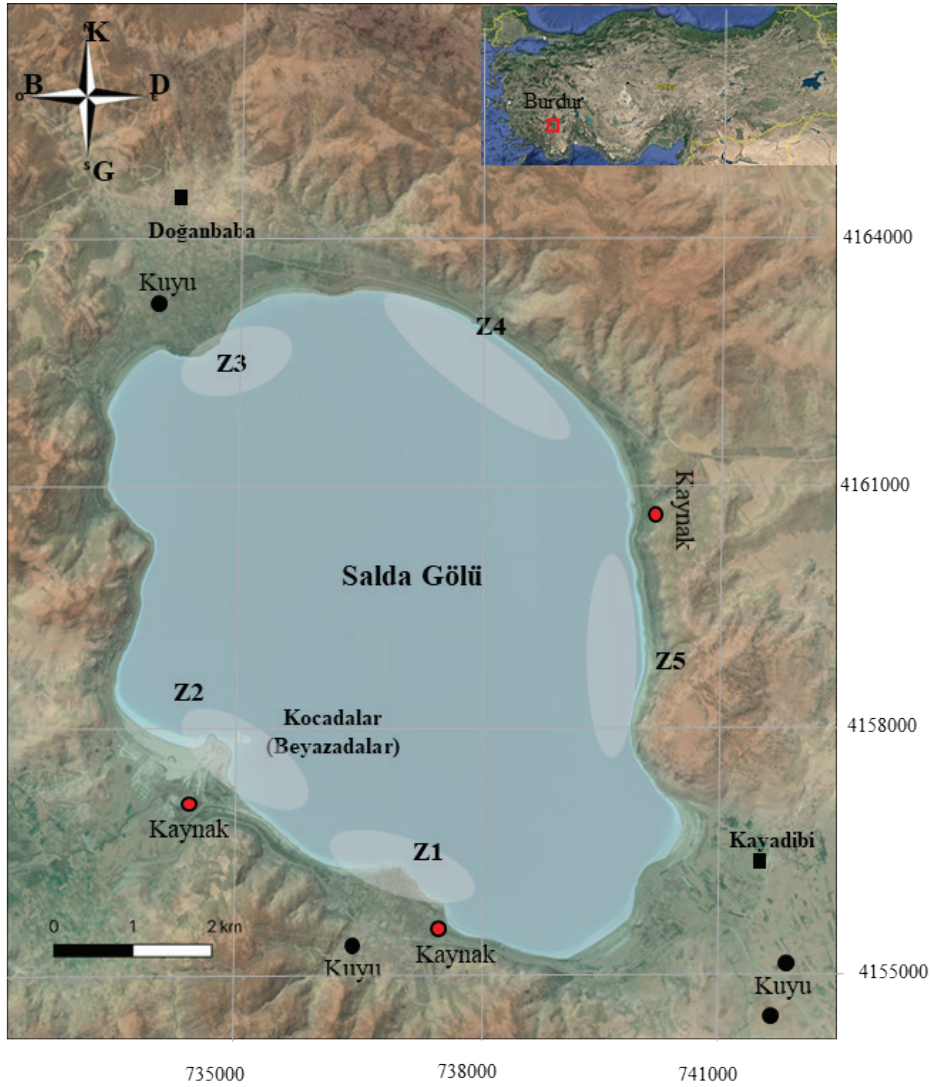
Güneş vd. (2024) tarafından yapılan çalışmalarda, bu yapıların stromatolitik ve trombolitik katmanlar içermesi nedeniyle mikrobiyalit olarak adlandırılması gerektiği ortaya konmuş; bu organo-sedimanter yapıların mikrobiyal toplulukları ilk defa belirlenmiştir. Sonraki çalışmalarla Salda Gölü'nde gelişen mikrobiyalitlerin, Mars gezegeninde yer alan Jezero Krateri içinde gelişen eski göl (paleolake) kalıntılarında bulunan SMK'lara olan benzerliği ortaya konmuştur (Garczynski vd., 2019, 2020; Horgan vd., 2020; Balcı vd., 2020; Güneş vd., 2022, 2024). Ca içeren eşleniklerine oranla, Mg'lu karbonatların oluşumu ve jeolojik kayıtlardaki korunumu hakkında bilğimiz oldukça kısıtlıdır. Şu ana kadar yapılan çalışmalar, Mg karbonatların oluşumunda etkin metabolik reaksiyonları ortaya koyarak, biyoiz potansiyellerine işaret etmiştir. Ancak, sonraki jeolojik süreçlerin (örn., diyajenetik) Mg karbonatların biyoiz potansiyellerini nasıl etkilediği, bu izlerin jeolojik kayıtlarda ne ölçüde korunduğu soruları hala cevaplanamamıştır. Bu konuda yürütülen çalışmalar, Mg karbonatların mineralojisi ve hücre dışı organik polimerlerin (HPM) kimyası arasındaki ilişki ile organikleri koruma potansiyeli üzerine yoğunlaşmıştır (Baltes vd., 2025, inceleme de). Süregelen bu çalışmalardan elde edilecek veriler, Salda Gölü mikrobiyalitlerinin biyoiz değerlerinin anlaşılmasına katkı koyacaktır.

Biyoiz çalışmalarının temelini oluşturan bu çalışmada, ilk defa mikrobiyalitlerin türleri, morfolojileri ve yapısal özellikleri göldeki konumlarına göre incelenerek, bu yapıların gelişmesinde olası mikrobiyal etkiler tartışılmıştır. Tüm veriler birlikte değerlendirilerek; mikrobiyalitlerin oluşmasında ve büyümesindeki biyolojik ve diğer çevresel etkiler değerlendirilmiştir. Söz konusu bu yapıların, biyojenik kökeninin belirlenmesi, Yerküre'deki jeolojik kayıtlarda korunan ve Mars'ta var olan veya var olabilecek benzer yapıları tanımamıza ve yorumlamamıza katkı koyacaktır.

ÇALIŞMA ALANI: SALDA GÖLÜ

Salda Gölü, Türkiye'nin güneybatısında göller bölgesinde, deniz seviyesinden yaklaşık 1140 m yükseklikte yer alan alkali bir göldür. 45 km² yüzey alanına sahip olan gölün ortalama su derinliği 80 m, maksimum derinliği ise yaklaşık 184 m'dir. Yılda bir kez karışan su kütlesi nedeni

ile ılık monomiktik olan göl, mevsimsel dereler dışında, önemli yüzey suyu drenaj ağı olmayan kapalı bir havzada yer almaktadır. Bu nedenle, göl su seviyesi ağırlıklı olarak, gölün güneybatı ve kuzeydoğu kesiminde ki yeraltı suyu sızıntısının yanı sıra, yağış ve buharlaşma ile kontrol edilmektedir (Şekil 1).



Şekil 1. İnceleme alanının yer bulduru haritası ile çalışma kapsamında tanımlanan mikrobiyalit zonları (Z1-Z5).

Figure 1. Geographic location of Lake Salda and microbialite-bearing zones (Z1-Z5).

Salda Gölü ve çevresi, çoğunlukla serpantinleşmiş, yer yer lizardite metamorfize olmuş harzburjitten oluşan ultramafik kayalarla kaplıdır. Bu allokton Kretase yaşlı birimler, Marmaris peridotiti olarak adlandırılmıştır (Şenel vd., 1997). Açık yeşil, gri, bej ve kahverengi renklerin yaygın olarak izlendiği serpantinleşmiş dünit bantları göl çevresinde, harzburjitlerle birlikte görülmektedir (Schmid, 1987). Gölün doğu kısmında Kayadibi Köyü civarında rekristalize, yer yer dolomitleşmiş Kretase yaşlı Dutdere kireçtaşı bulunmaktadır. Göl ve çevresinde otokton birimler, güncel alüvyon sedimanlarla temsil edilmektedir. Neojen yaşlı alüvyonlar gevşek tutturulmuş, yer yer yamaç molozları ile birliktelik gösterirler. Gölü çevreleyen güncel birimler içerisinde bantlar şeklinde gözlenen magnezyum karbonatlı seviyeler; göl seviyesinde ki değişimlere işaret etmektedir.

Yeşilova'nın güneydoğusunda, Kocaadalar'ın güneybatısında ve Doğanbaba'nın kuzeybatısında, serpantin ve gabro çakıl ve çakıllarından oluşan; yüzeyleri yoğun bir şekilde ayrılmış alüvyal deltaları bulunmaktadır (Şekil 1). Salda Gölü kıyıları, bu deltaları çevreleyen kum veya çamur düzlüklerinden oluşan düşük enerjili plajlardan, dik ve kayalık kıyılara kadar çeşitli jeomorfolojik yapılar göstermektedir.

MATERYEL ve METOT

Arazi Gözlemleri ve Örneklem Çalışmaları

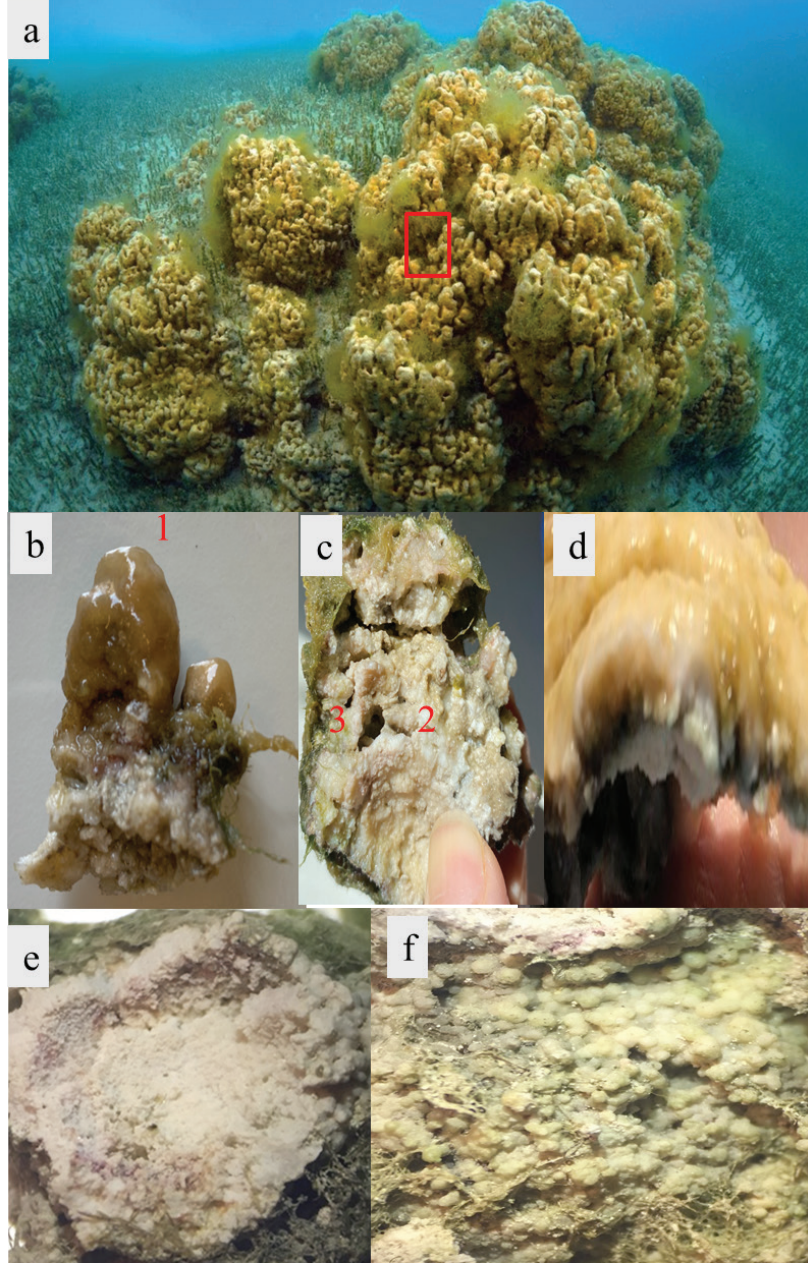
Salda Gölü mikrobiyalitleri üzerinde yürütülen ve bu çalışma kapsamında sunulan, makro ve orta ölçekte ki morfolojik ve sedimantolojik veriler; 2019-2024 yılları arasında gerçekleştirilen arazi gözlemleri ve ölçümlerine dayanmaktadır. Göl, 2022 yılında en yağışlı dönem olarak belirlenen Şubat ve Mart ayında yalnızca 32 cm yağış almıştır. Bu olay neticesinde göl seviyesinde ki önemli düşüş; kıyı boyunca ve kıyından yaklaşık 50-100 m uzakta güncel olarak gelişen mikrobiyalitlerin

detaylı gözlemlenmesine ve örneklenmesine olanak sağlamıştır. Arazi gözlem ve ölçümlerinin yanı sıra, güncel ve tafanomik (fosilleşme) süreçlerin etkisi altında bulunan yarıfosilleşmiş mikrobiyalitlerden el örnekleri toplanmıştır. Gölde mikrobiyalit barındıran ortamlar haritalanmış, mikrobiyalitlerin morfolojik özellikleri detaylı olarak incelenmiş ve mikrobiyalit barındıran ortamların depolanma karakteristikleri kayıt altına alınmıştır. Haritalama çalışmaları kapsamında 5 farklı mikrobiyalit oluşum zonu (n=Z1-5) belirlenmiş; her bir zonda ki mikrobiyalitlerin makro ve orta ölçekte morfolojilerine dayanarak, tanımlayıcı tür sınıflandırmaları yapılmıştır. Petrografik çalışmalar için her bir zondan (yaklaşık 10-15 cm büyüklüğünde) el örneği toplanmış (n=6); bez torbaya konmuş ve etiketlenmiştir.

Ayrıca, bu çalışmada Zon 1 olarak adlandırılan ve gölün batısında Kocaadalar (Beyaz adalar) civarında yer alan kesimde, Ağustos 2022 tarihinde, 15 m su derinliğinde büyüyen mikrobiyalitler dalgıç yardımı ile örneklenmiştir. Bu derinlikte oluşan mikrobiyalitlerden, steril, organik içermeyen geniş ağızlı cam şişeler yardımı ile su örnekleri (n=4) alınarak, steril spatula ve kesiciler ile mikrobiyalit örnekleri toplanmıştır (n=8). Daha sonra ki analizlere kadar ilgili örnekler, İstanbul Teknik Üniversitesi, Jeomikrobiyoloji-Biyojeokimya Laboratuvarı'nda (ITU-GBL) -21 °C'de tutulmuştur. Örnekler soğuk zincir şeklinde İstanbul Teknik Üniversitesi-Jeomikrobiyoloji-Biyojeokimya Laboratuvarı'na ulaştırılmış ve analizlere kadar -21 °C'de saklanmıştır. Laboratuvarda çözündürülen mikrobiyalit örnekleri, daha sonra steril bir bisturi yardımıyla mikrobiyolojik kabin içerisinde, renk ve doku farklılıklarına göre örneklenmiş ve mikrobiyolojik tür analizi için DNA çözeltisi (LifeGuard Soil Preservation solution, MoBio Laboratories, Carlsbad, CA, USA) içine koyulmuştur. Bu amaçla, dört farklı tabaka (L1-L4) örneklenmiştir. Bu örnekler, laboratuvarda sodyum-glutaraldehit ve osmiyum tetraoksit kullanılarak mikroskobik

analizler için hazır hale getirilmiştir. Bu aşamayı takiben örnekler Boğaziçi Üniversitesi İleri Araştırmalar Merkezi'nde taramalı elektron

mikroskopu (Philips XL30 ESEM-FEG/EDAX) ile incelenmiştir.



Şekil 2. a) 15 m su derinliğinde oluşan mikrobiyalitten bir görüntü (Güneş vd., 2024). **b)** Mikrobiyalitler üzerinde gelişen parmak şekilli mini sütun yapılarının yakından görüntüsü (a panelinde kırmızı kare). **c)** Dikey kesit. **d-f)** Parmak yapılarının farklı seviyelerinden görüntü.

Figure 2. a) A view of microbialites growing at 15 m water depth (modified from Güneş et al., 2024). **b)** Close view of a finger-shaped structure. **c)** Vertical cross-section. **d-f)** Views of various parts of the finger-shaped structure in b.

DNA İzolasyonu ve 16S rRNA Analizi

15 m su derinliğinde büyüyen mikrobiyalitlerden elde edilen tabakalarda, DNA izolasyonu ve 16S rRNA gen analizleri yapılmıştır (n=4) (Şekil 2). Örneklerden genomik DNA ekstraksiyonu özel kitler (DNeasy Power Lyzer Power Soil) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen DNA'nın 16S rRNA kodlama bölgeleri, V4 bölgesini kodlayan ve neredeyse tüm bakteriyel ve arkeal taksonları hedefleyen 515FB (GTGYCAGCMGCCGCGGTAA) ve 806RB (GGACTACNVGGGTWTCTAAT) içeren evrensel EMP (Earth Microbiome Project) primer seti ile polimeraz zincir reaksiyonu (PCR) ile çoğaltılmıştır (Caporaso vd., 2011). PCR karışımları 0,8 x PCR Master Mix (Thermo Fisher Scientific), her bir ileri ve geri barkodlu primerden 0,2 µM, 1,0 µL şablon DNA, Phusion® High-Fidelity DNA polimeraz (Thermo Fisher Scientific) ve toplam 25 µL reaksiyon hacmine kadar, DNA içermeyen saf su ile hazırlanmıştır. PCR, 3 dakika boyunca 94 °C'de tek döngü, 45 saniye boyunca 94 °C'de 35 döngü, 60 saniye boyunca 50 °C'de, 90 saniye boyunca 72 °C'de ve 10 dakika boyunca 72 °C'de tek döngü ile başlayarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen örnekler Illumina iSeq 100 dizileme cihazında (Illumina, San Diego, CA, ABD) dizilenmiştir.

BULGULAR

Mikrobiyalitlerin Türü, Morfotipi ve Göldeki Dağılımı

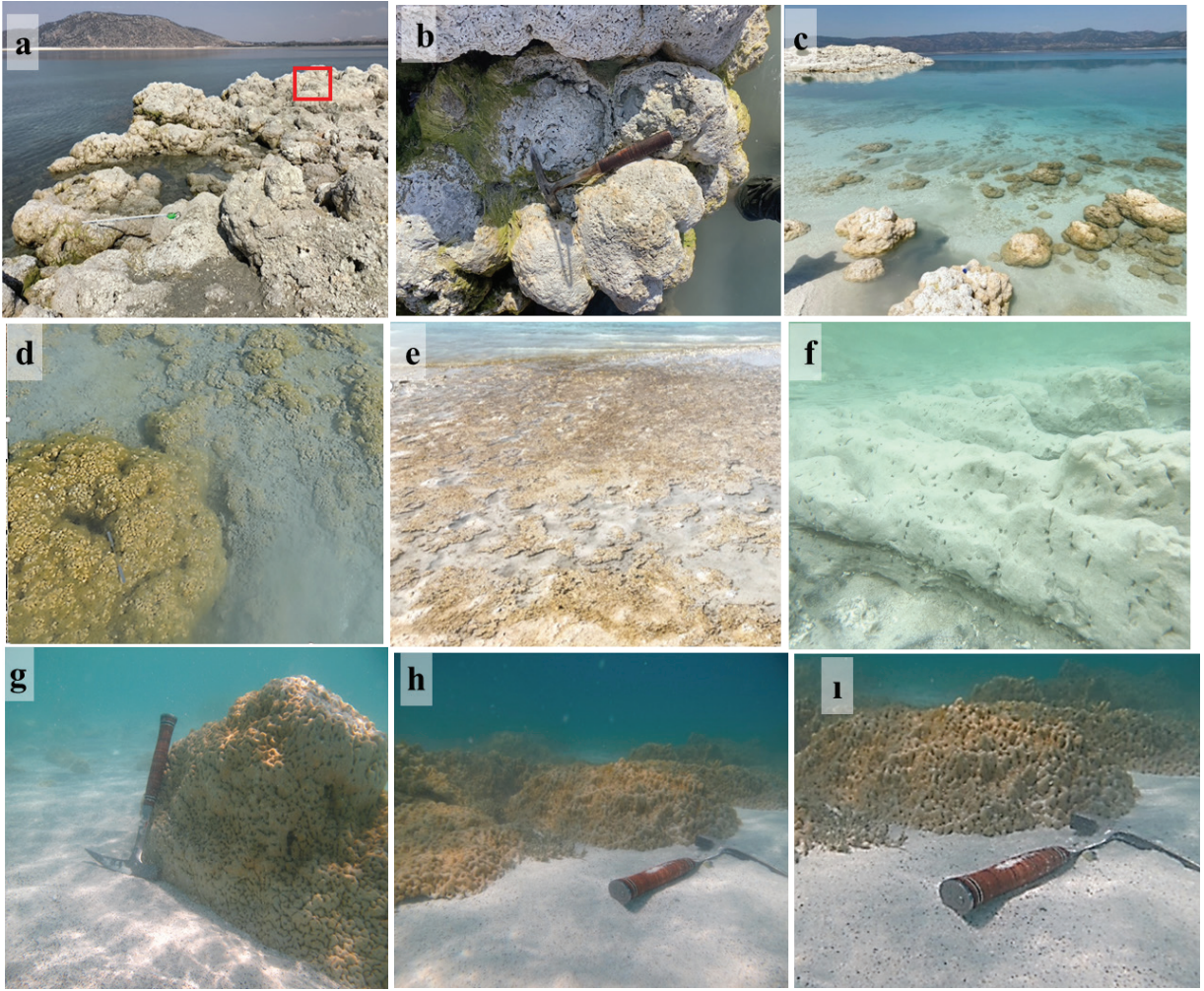
Bu bölümde, gölde >1 m² den daha büyük alan kaplayan mikrobiyalitler ve morfolojileri tanımlanarak; gölde ki mekansal dağılımları ortaya konacaktır.

Mikrobiyalitlerin sınıflandırılmış özelliklerine dayanarak, tüm göl çevresi boyunca beş farklı zonda, şu mikrobiyalit türleri tespit edilmiştir: Stromatolitler, trombolitler, stromatolitik-trombolitler, dendrolitler ve herhangi bir iç yapı göstermeyen mikrobiyal olarak tetiklenmiş sedimanter yapılar (MSY) (Şekil 3). Tanımlanan

mikrobiyalit türleri arasında, stromatolitik-trombolit göldeki en yaygın mikrobiyalit türüdür. Gölde, stromatolitik-trombolitler su seviyesine bağlı olarak ya üst üste yığılmış kubbeler (Şekil 3a ve b) ya da tek tek yarım dom (kubbe) şeklinde bulunurlar; yarım dom morfolojisine sahip olanlar genelde sığ sularda (<0,5 m) baskındır (Şekil 3c ve d). Su derinliği arttıkça (>10 m), stromatolitik trombolitler uzunlamasına gelişen birbirine bağlı kolon morfoloji sergilemektedir (Şekil 2a). Mikrobiyalitlerin türleri ve morfotipleri ile göldeki mekansal dağılımı aşağıda detaylı olarak verilmiştir:

Zon 1

Gölün güney batısında yer alan bu zonda, daha çok iç içe büyümüş kubbelerin (> 40 cm) istiflenmesi ile oluşan böbreğimsi şekilli morfotipe sahip stromatolitik-trombolitler mevcuttur (Şekil 3a ve b). Bu mikrobiyalit istiflerinin büyüklüğü yaklaşık 1m ile 5 m arasında değişiklik göstermekte olup, zaman zaman atol yapıları oluşturmaktadırlar. Bireysel kubbe şekilli mikrobiyalitler, soğansı büyüme yapısı sergiler (Şekil 3b). Bireysel kubbelerin en üst yüzeyi sıklıkla turuncu ve yeşilimsi renkte, organikçe zengin yumuşak bir katmana sahiptir. Bu katman, nadiren beyin şeklinde bir yapı sergilemektedir (Şekil 4a, b ve c). Bir kubbe yapısının yarı kesiti incelendiğinde, orta ölçekte (cm) stromatolitik, trombolitik, ve stromatolitik-trombolit mikrobiyal türleri izlenebilir (Şekil 4a, b ve c). Stromatolitler, mm boyutunda iyi korunmuş dışa doğru yanal olarak büyüyen laminalı yapılar sergilerken, alt zonu pıhtı dokusuna sahip, üst zonu laminalı yapı sergileyen oluşumlar stromatolitik-trombolitler olarak sınıflandırılmıştır (Şekil 4b). Bu oluşumların yüzeyi, yumuşak doku sergilemektedir. Beyinsiyüzey yapısına sahip (Şekil 4c) oluşumlar, birkaç cm uzunluğunda, alt zonda masif karbonat şeklinde, üste doğru zayıf tabakalı kolonsu stromatolitik trombolitik yapılar oluşturmalar (Şekil 4d). Bu oluşumlar, Zon 1'de yaygındırlar.



Şekil 3. Salda Gölü mikrobiyalitlerinde tanımlanan morfotipler: **a)** Zon 1’de yeni yüzeylenmiş, yumuşak yüzey dokusu ve soğansı iç büyüme yapısına sahip yığılmış kubbe şekilli mikrobiyalitler (ölçek 1 m); **b)** Panel A’da kırmızı ile sınırlı alanın yakından görüntüsü, soğansı büyüme yapısı gösteren thrombolitik mikrobiyalitin yakından görüntüsü (ölçek 30 cm; Güneş vd., 2024’den değiştirilmiştir); **c-d)** Zon 2’de Beyaz Adalar olarak bilinen mikrobiyalit topluluğundan görüntü, **d)** Zon 2’de radyal olarak büyüyen kolloform yüzey dokusuna sahip yarım dom yapılı oluşumlar (ölçek 15 cm) **(e)** Zon 1’de belirgin bir morfoloji ve büyüme yapısı göstermeyen mikrobiyalit oluşumları **(f)** Zon 2 ve 3’de gelişen mikrobiyalit tabakaları. **g-i)** Zon 4, 5 ve 6’da yanal olarak büyüyen yarı sferoidal mikrobiyalit tipleri (ölçek 30 cm).

Figure 3. Morphotypes identified among Lake Salda microbialites: **a)** Stacked-dome shaped microbialites (scale 1 m) in Zone 1, exhibiting soft surface texture and bulbous internal growth structure; **b)** Close-up of thrombolitic microbialites with bulbous internal structure in a (scale 30 cm) (modified from Güneş et al., 2024); **c-d)** View of the microbialite assemblage known as the White Islands in Zone 2 **(d)** Close-up views of formations in Zone 2, radially growing semi-domed formations with colloform surface texture (scale 15 cm); **e)** Microbialite formations in Zone 1 with no distinct morphology or growth structure **(f)** Microbialite growing layers in Zones 2 and 3. **g-i)** Laterally growing semi-spheroidal microbialite types (scale 30 cm) in Zones 4, 5 and 6.



Şekil 4. Mikrobiyalitlerin orta ölçekte (cm ölçeğinde) değişik iç yapıları: **a)** Stromatolitik ve **(b)** Stromatolitik trombolitik yapılar, Zon 1. **c, d)** Beyinsî yüzey yapısı ile az gelişmiş kolon yapısı gösteren stromatolitik trombolitik mikrobiyalit, Zon 1. **e)** Stromatolitik üst tabakalara sahip oluşum (siyah ok), Zon 2. **f)** Stromatolitik trombolitlerin üst zonlarında gelişen yumru ve çıkıntı yapısı, Zon 2. **g)** Dendritik iç yapı, Zon 2. **h)** Organikçe zengin matriks içinde tutturulmuş karbonat nodüllerinden oluşan yapı **(i)** Alt kısmı zayıf stromatolitik tabaka gelişimi (kırmızı ok), üst kısmı çalı benzeri bir yapı (beyaz ok) gösteren parmak şekilli mini kolon yapıları (güncel oluşumlar için bakınız Şekil 2b ve c) (a, f Günes vd., 2024'ten değiştirilerek alınmıştır)

Figure 4. Different internal structures of microbialites at meso-scale (cm scale): **a)** Stromatolitic and **(b)** Stromatolitic thrombolitic structures, Zone 1. **c, d)** Thrombolitic microbialite showing underdeveloped columnar structure with brain-like surface textures, Zone 1. **e)** Formation with stromatolitic upper layers, Zone 2 **(f)** Lump and ridge structures developed in the upper zones of stromatolitic thrombolites **(g)** Dendritic internal structure, Zone 2. **h)** Formation consisting of carbonate nodules embedded in an organic-rich matrix, Zone 3-4. **i)** Finger-shaped mini-column structures (see Figure 2 (b) (c) for recent formations), showing weak stromatolitic layers in the lower part (red arrow) and shrub structure in the upper part (white arrow).

Zon 2

Göldeki en geniş mikrobiyalit oluşumları, Kocaadalar (Beyaz adalar) burnu olarak bilinen Zon 2’ de yer almaktadır. Bu oluşumların meydana getirdiği ada nedeniyle, “Beyazadalar” olarak ta adlandırılan bu alanda, ana mikrobiyalit oluşumları, kıyıdan yaklaşık 50 m uzakta yer almaktadır (Şekil 1 ve 2). Gölün bu kesimini, hidromanyezit kum birikintileriyle kaplı 3 km’den daha uzun beyaz bir kumsal kaplamaktadır. Bu alanda, Salda Deresi’nin ırmağının meydana getirdiği geniş bir delta yer almakta ve göle sediman girişini sağlamaktadır.

Kıyı kesimlerde oluşan mikrobiyalitler, birkaç santimetreden, metre ölçeğine kadar çapa sahip yarı dom ve bu domların birleşmesi ile oluşan karnabahar morfolojisine sahiptirler (Şekil 3c ve d). Bu mikrobiyalitler; stromatolitik ve trombolitik olarak sınıflandırılmıştır. Bu mikrobiyalitlerin yüzeyi kolloform yapı özelliği gösterir. Kıyıya yakın dom morfolojisine sahip mikrobiyalitlerin iç yapısı orta ölçekte oldukça çeşitlilik göstermektedir. En üst yüzeyde mm boyutunda sürekli ince tabakalı yapısı ile stromatolitik ve alt kısımda ise tabaka yapısı göstermeyen, trombolitik oluşumlar mevcuttur (Şekil 4e). Bazı stromatolitik-trombolitlerin en üst kesimlerinde çıkıntılar şeklinde düğüm/yumru yapıları bulunmakta, en alt zonda ise masif karbonat oluşumları bulunmaktadır (Şekil 4f).

Artan su derinliği ile birlikte, yanal olarak bağlanmış kolon benzeri morfolojiye sahip mikrobiyalitler yakın zamanda keşfedilmiştir (Şekil 2a; Güneş vd., 2022, 2024). Sığ oluşumlarla karşılaştırıldığında, bu derin büyüyen mikrobiyalitlerin en üst yüzeyi, tipik olarak birbirine bağlı, iyi gelişmiş, yeni büyüyen, parmak şeklindeki mini sütunlarla (birkaç cm boyutunda) kaplıdır (Şekiller 2b ve 4i). Bu parmak şeklindeki mini sütunların en üst kısmı, organikçe zengin, turuncu kahverengi renktedir

(Şekil 2b) ve hemen her zaman yeşil renkli alg ve fototrofik mikroorganizmalarca zengin bir zon ile aralanmalıdır (Şekil 2c ve d). Parmak şekilli yapıların üst kısmında dik parabolik tabakalar bulunurken, en iç kısımda, genellikle nodüler karbonat taneleri bulunmakta ve yer yer mor renkli bir tabaka bu oluşumlara eşlik etmektedir (Şekil 2c-f). Ayrıca, Zon 2’de belirgin bir morfolojisi ve iç yapısı olmayan sığ çamurlu tortulları kaplayan tipik olarak birkaç mm’den cm’ye kadar yumuşak, turuncu, açık gri renkli, göz yapısı boşluklarına sahip mikrobiyal tabakalar tanımlanmıştır (Şekil 3e).

Zon 3-4 ve 5

Üçüncü ve dördüncü zonlar, gölün K ve KD’sunda yer almaktadır (Şekil 1). Zon 3 ve 4, yaklaşık 2,5 kilometre arayla, Değirmendere’nin alüvyon deltasının oluşturduğu bir plaj ortamı ile ayrılmıştır. Bu zonlar, gölde tanımlanan diğer zonlara göre, daha seyrek mikrobiyalit oluşumları içermektedir. Zon 3’de kıyıdan yaklaşık 100 m içerde tabular şekilde kıyıya dik uzanan ve üzeri ince taneli yumuşak mikrobiyal tabaka ile kaplı belirli bir iç yapı taşımayan oluşumlar mevcuttur (Şekil 3f). Yine bu zonda, orta ölçekte dendrolitik iç yapısına sahip dom morfolojili mikrobiyalit oluşumları tespit edilmiştir (Şekil 4g). Zon 4’te yaygın ve Zon 3’te daha az oranda yaklaşık 3-4 m su derinliğinde yanal olarak büyüyen yarı dom morfolojiye sahip mikrobiyalitler mevcuttur (Şekil 3g-ı). Bu mikrobiyalitlerin üst yüzeyi, Zon 2’de tespit edilen iyi gelişmiş ve korunmuş parmak şeklindeki mini sütün yapılarıyla kaplıdır (Şekil 3g ve ı). Zon 4’de mm veya daha küçük büyüklüğe sahip karbonat nodüllerinin organik matriks içinde çimentolanması ile oluşan mikrobiyalit yapıları mevcuttur (Şekil 4h). Bu oluşumlar, kıyıdan yaklaşık 5 m içerde sığ sularda tespit edilmiştir. Zon 5 güncel mikrobiyalitlerin en az izlendiği göl kesimidir (Şekil 1).



Şekil 5. Göl ve çevresinde tanımlanan fosil mikrobiyalit yapılarından görüntüler. **a-b)** Mikrobiyalit kalıntıları içeren teras oluşumları. **c),** Trombolitik fosil mikrobiyalitler ve **(d)** üst zonlarında tanımlanan parmak yapıları. **e)** Karnabahar morfolojili fosil mikrobiyalitler. **f)** Beyinsi yüzey dokusu gösteren fosil mikrobiyalitler

Figure 5. Field views of fossil microbialite structures identified in and around the lake. **a-b)** Terrace formations containing microbialite remains. **c),** Thrombolitic fossil microbialites and **(d)** Finger-shaped mini-column structures identified in their upper zones. **e)** Fossil microbialites with cauliflower morphology. **f)** Fossil microbialites showing brain-like surface texture.

Zon 4’de olduğu gibi, bu zonda da mikrobiyalitler sığ su derinliğinde (< 4 m) ağırlıklı olarak yarı dom morfolojisinde ve yanıl büyüme gösteren yapılar şeklindedir. Bu mikrobiyalitlerin en üst kesimi, iyi gelişmiş cm boyutunda parmak şeklindeki yapılar ile kaplıdır.

Göl ve çevresindeki fosil ve yarı fosil mikrobiyalit yapıları tanımlanmış ve sınıflandırılmıştır (Şekil 5). Özellikle son yıllarda göl suyundaki çekilmeler; bu tür yapıların detaylı bir şekilde incelenmesine olanak sağlamıştır. Zon 1 ve 5’te kıyıya paralel olarak uzanan kalınlığı yaklaşık 5-10 m arasında değişen dom şeklinde fosil mikrobiyalitlerin kalıntılarını içeren hidromanyezit terası mevcuttur. (Şekil 5a ve b). Benzer oluşumlar Zon 5’te de mevcuttur. Bu oluşumların yaşı yaklaşık olarak 15000 ± 1000 yıl olarak belirlenmiştir (Balci vd., 2025). Zon 3’te yakın zamanda açığa çıkan, iyi korunmuş trombolitik mikrobiyalitlerin üzerinde gelişen parmak şeklindeki yarı-fosilleşmiş oluşumlar mevcuttur (Şekil. 5c ve d). Zon 4’te kıyıya dik uzanan yaklaşık 20 cm kalınlığında çamur tabakaları üzerinde gelişen ve beyinsî yüzey dokusuna sahip yarı fosilleşmiş, mikrobiyalit oluşumları tanımlanmıştır (Şekil 5e ve f).

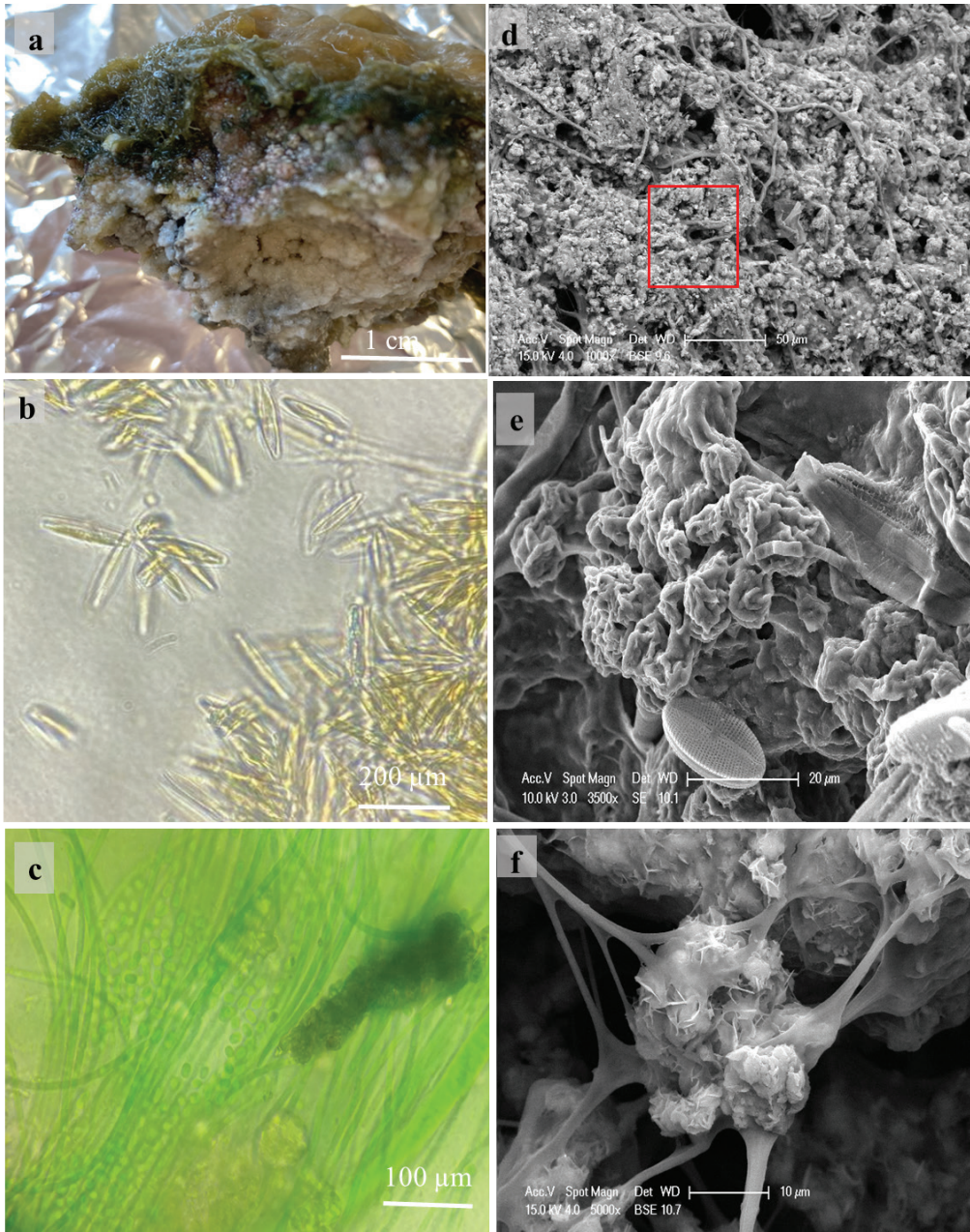
Mikrobiyalitlerin Tabaka Yapısı ve Çeşitliliği

İncelemeye konu olan ve 15 m su derinliğinde gelişen mikrobiyal tabakalar (L1-4), gölde sığ sularda gelişen diğer mikrobiyal tabakalar ile benzerlik sergilemektedir (Şekil 6). Mikrobiyal tabakanın en üst yüzeyi, genellikle mm, nadiren cm ölçeğinde, tipik olarak turuncudan yeşilimsi sarıya değişen renklerde, organikçe zengin, yapışkan ve jelatinimsî bir dokuya sahiptir (Şekil 2b, d ve 6a). Bu yüzeyin hemen altında, genellikle koyu ve açık yeşil renkli 1 cm’den küçük katmanlar bulunmakta ve bunlara sıklıkla gri siyah renkli bir katman eşlik etmektedir. Mikrobiyal katmanın iç zonunda nodüler karbonatlarla birlikte mor renkli bir katman mevcuttur. Turuncu renkli tabakanın

ışık mikroskobu incelemelerinde, çarpıcı bir diyatom çeşitliliği ve yoğunluğu ortaya çıkmıştır (*Cymbella* sp., *Gomphonema* sp., *Pinnularia* sp., *Synedra* sp., Eunotoid , *Epithemia adnate* ve *Navicula recens*) (Şekil 6b). Koyu ve açık yeşil renkli katmanın ışık mikroskobu incelemelerinde ipliksi (*Rivularia* sp., *Schizothrix* sp. ve *Lyngbya* sp.) ve kokoidal siyanobakteriler (*Synechococcus* sp., ve *Gloeocapsa* sp.) ile az sayıda diyatom tespit edilmiştir (Şekil 6c).

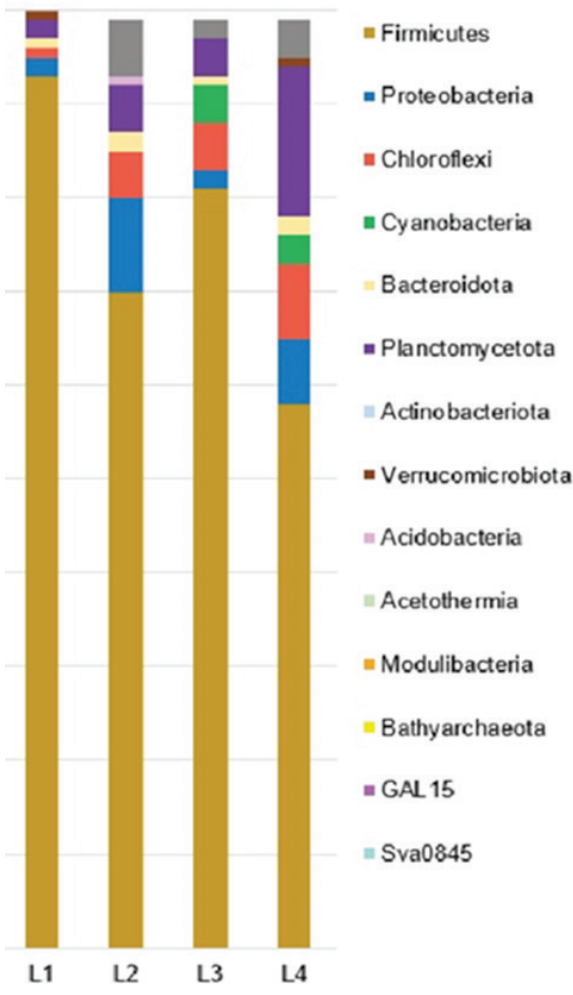
İlgili katmanların, taramalı elektron mikroskop görüntüleri, diyatom, mikroorganizma ve mineral ilişkisini ortaya koymuştur. Bu görüntülerde, filamentlerin ve hücre dışı polimerik (HPM) maddenin, Mg karbonatlarla kaplı olduğu kolaylıkla görülmektedir (Şekil 6d-f). Mg karbonatlar, plaka benzeri kristallerin radyal olarak büyümesi sonucu oluşan 10-50 µm kümeler halinde mevcuttur (Şekil 6e ve f). Diyatom-mikroorganizma agregatları küreselden hafif uzamaya kadar değişen şekillerde ve genellikle 20-50 µm çapındadır. Bazı diyatomeler mineral oluşumlarının içinde ve dış kenarlarında görülebilir (Şekil 6e). Genellikle iyi korunmuşlardır ve fröstül yapılarında önemli parçalanma veya korozyon özellikleri nadirdir (Şekil 6e).

15 m su derinliğinde büyüyen mikrobiyal tabakalar (L1-L4) üzerinde ilk defa yapılan mikrobiyal tür çalışmaları, sığ mikrobiyalitlere oranla daha farklı bir mikrobiyal topluluk yapısı ortaya koymuştur (Balci vd., 2020). Firmiküs mikrobiyalitin dört farklı katmanında da (L1-L4) prokaryotik topluluğa hakim olmuştur (Şekil 7). L1 örneğinde mikrobiyal topluluğun % 93’nü; L2 örneğinde %58’ini, L3 örneğinde %70’ini ve L4 örneğinde %81’ini Firmiküs filumu oluşturmaktadır (Şekil 7). Ayrıca, Proteobakteri (%10) ve Planctomycetota (%16) sırasıyla L2 ve L4 örneklerinde %10’dan daha yüksek oranda tespit edilmiştir. Planctomycetota ve Siyanobakteri filumlarının bollukları ise sırasıyla % 2-7 ve 1-4 oranında bulunmuştur.



Şekil 6. Salda gölünde yaygın olarak görülen güncel mikrobiyal katmanlarından görüntüler. **a)** Sarımsı, kahverengi renkli, jel yapısına sahip tabaka ve **(b)** tabakanın ışık mikroskop görüntüsü. **c)** Yeşil renkli tabakanın ışık mikroskop görüntüsü ve farklı morfolojiye sahip siyanobakteriler. **d)** Filamentler içinde tutturulan çökelimlerin taramalı elektron mikroskop görüntüsü. **e)** Yoğun şekilde filamentler ve diatom çevresinde oluşan karbonat çökelimleri. **f)** Organik matris içinde bıçak ve plaka şeklindeki hidromanyezit kristalleri.

Figure 6. Images of typical microbial layers commonly observed in Lake Salda. **a)** Yellowish-brown coloured layer with gel structure and **(b)** Light microscope image of this layer. **c)** Light microscope image of green-coloured layer and cyanobacteria with different morphology. **d)** Scanning electron microscope image of deposition around the filaments. **e)** Dense filaments and carbonate deposition around diatoms. **f)** Hydromagnesite crystals with knife-like and platy forms within organic matrix.



Şekil 7. 15 m su derinliğinde büyüyen mikrobiyalitlerin üst zonlarında gelişen mikrobiyal katmanların mikroorganizma çeşitliliği.

Figure 7. Diversity of microbial layers developing on microbialites that grow at 15 m water depth.

Cins seviyesinde L1 tabakasındaki Firmiküs'ün neredeyse tamamını *Exiguobacteriu* sp.' oluşturmaktadır. Diğer cinsler ise, *Bacillus* ve *Chryseomicrobium*'dur. A4b ve SBR1031, *Coleofasciculus*, *Brevundimonas*, *Hyphomicrobium* ve *Lysobacter* ve *Luteolibacter* cinsleri'de tüm tabakalarda tespit edilmiştir. Birçok mikrobiyal popülasyon karbon ve sülfür döngüsü ile ilişkilendirilmiş ve ilk kez tür düzeyinde (örneğin *Exiguobacterium*

chiriquhucha) tanımlanmıştır. Bu tespit edilen yeni türlerin Mg karbonat oluşumunda olası rolleri araştırılmaktadır.

Güncel Mikrobiyalitlerin Jeokimyası ve Mineralojisi

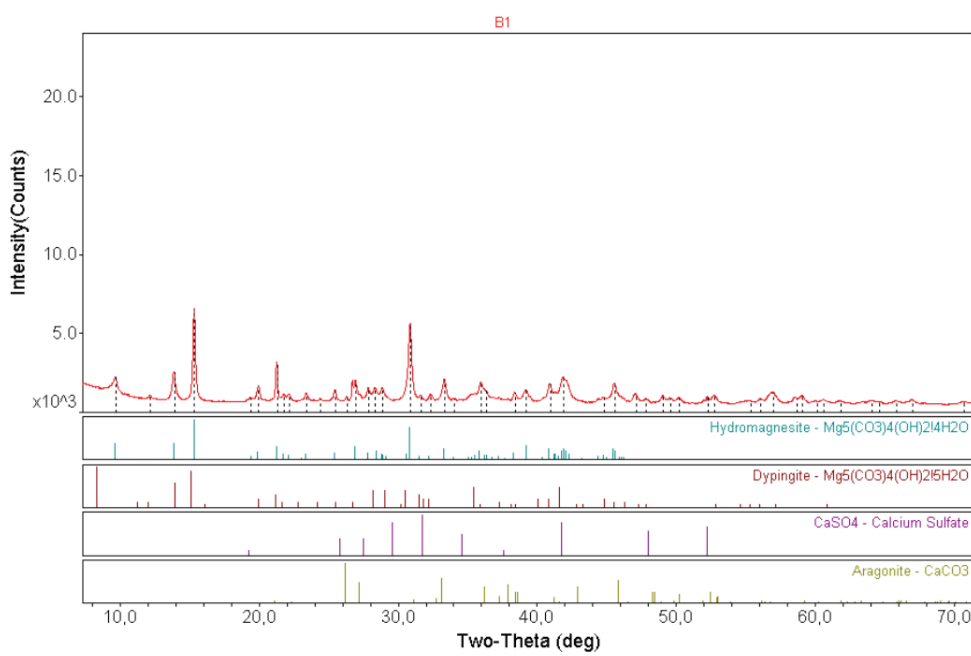
Mevcut mineralojik ve jeokimyasal veriler, Salda mikrobiyalitlerinin %40-50 arası MgO, %2-3 CaO, %0,2-5,0 Fe₂O₃, %1-2,5 SiO₂ içerdiğini ve diğer elementlerin %1'i aşmadığını göstermektedir (Balcı vd., 2020; Güneş vd., 2024). Fosil Salda mikrobiyalitlerine oranla güncel olanlar, sırasıyla yaklaşık %7 ve %1 daha az MgO ve SiO₂ içermektedir. Mg >> Ca > Na > K > Si > Fe > Al şeklindeki element sırası göldeki hem fosil hem de güncel mikrobiyalitler için tipiktir (Balcı vd., 2021; Güneş vd., 2024). Mikrobiyalitlerin mineralojik bileşimi element bolluklarıyla tutarlıdır. Fosil ya da yarı fosil mikrobiyalitlerin ana SMK mineral bileşeni hidromanyezit (Mg₅(CO₃)₄·(OH)₂·4H₂O) minerali olarak belirlenmiştir. Önceki çalışmalar, mikrobiyalitlerin hidromanyezit içeriklerinin yaklaşık %85-90, aragonit içeriğinin %3-5 arasında değiştiğini ortaya konmuştur (Güneş vd., 2024; Balcı ve Demirel, 2018; Balcı vd., 2020). Bu çalışma kapsamında, güncel olarak 15 m su derinliğinde büyüyen mikrobiyal katmanlarda yapılan mineralojik çalışmalarda, hidromanyezitin yanı sıra ilk defa poligorskite (Mg, Al)₂Si₄O₁₀(OH)·4(H₂O) ve dipinjit (Dypingite, Mg₅(CO₃)₄·(OH)₂·5H₂O) minerali tespit edilmiştir (Şekil 8). Bu tespit ile uyumlu olarak, Salda Gölü'nü yansıtan koşullarda yapılan deneysel çalışmalarda da dipinjit (Mg₅(CO₃)₄·(OH)₂·5H₂O) minerali biyotik deneylerde, neskuhonit minerali (nesquehonite, MgCO₃·3H₂O) ise abiyotik deneylerde tespit edilmiştir (Baltes vd., 2025). Bu yeni mineralojik veriler, mikrobiyalitlerin oluşumu ve biyoiz potansiyellerinin belirlenmesi açısından kritik bilgiler taşımaktadır. Örneğin, mikrobiyal katmanda belirlenen otojenik Mg silikat oluşumları, Salda Gölü'ne benzer ortamlarda yaygın olarak gözlemlenmiştir (Chagas vd., 2016; Gerard vd., 2013) ve silikalı fazların bu oluşumların fosilleşme süreçlerine

karşı dayanımlarını arttırması ve korunmasına katkı koyması nedeniyle önemlidir.

Mikrobiyalitlerin Petrografik Analizleri

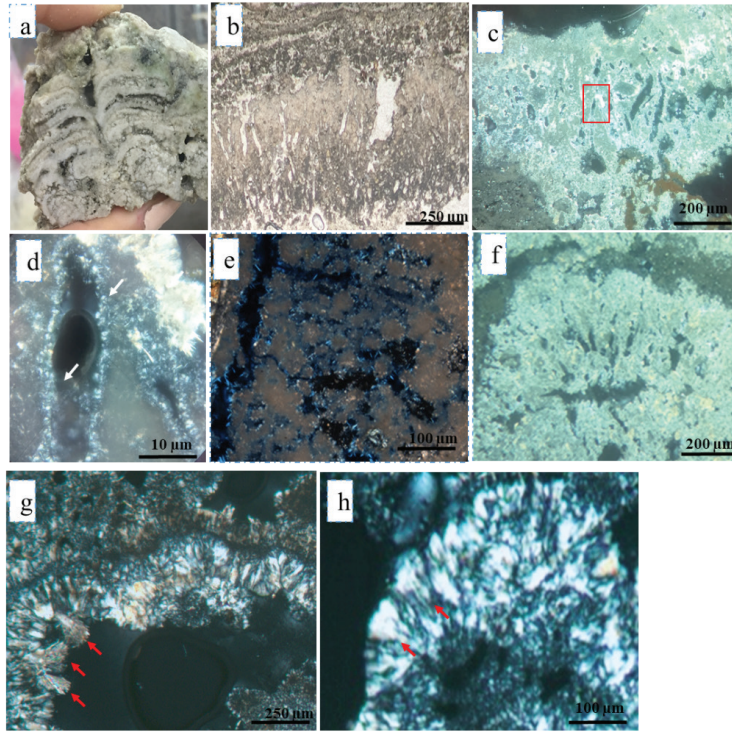
Gölde yaygın olarak bulunan yarı fosilleşmiş stromatolitik trombolitler (Şekil 4b) üzerinde yapılan petrografik analizler, mikritik, peloidal mikritik ve laminalı bir matriks ile pıhtı dokusu içinde korunan filament yapılarını ortaya koymuştur (Şekil 9). Genel olarak, filament bakımından zengin mikritik karbonatların en üstünde açık kahverengiden beje kadar değişen renkte gözenekli bir yapıya sahip bir zon mevcuttur. Bu zon genellikle yüksek miktarda peloid içermekte ve ince laminasyonlarla devam etmektedir (Şekil 9a). Mikritik karbonat genellikle daha bej alanlarla ilişkilidir ve kriptokristalin dokuya sahip karbonatlarla iç içe gelişmiştir (Şekil 9d). Göldeki trombolitler, özellikle Zon 2'de, yaygın olarak organik maddece zengin matriks içerisinde küresel/yarıküresel karbonat çökelimlerinin tutturulması sonucu oluşan tipik

pıhtı dokusu sergilerler (Şekil 9d ve e). Pıhtı dokusuna sıklıkla ince taneli karbonatlar eşlik etmektedir (Şekil 9c ve e). Salda Gölü'nde, mikrokristalin karbonatlar mikrobiyal hücreler veya hücre gruplarını çevreleyen organik matriks içinde çökelmektedir (Şekil 9c). Mikritik taneler ve mikritik matriks içinde yoğun şekilde bulunan, kavisli, iyi korunmuş, yuvarlak tepeli filamentlerin varlığı gözlemlenebilir (Şekil 9b, c, d ve e). Organikçe zengin ve pıhtı dokusu sergileyen bu alanda, filamentlerin içi boş görünmektedir; bunlar büyük olasılıkla filamentli siyanobakterilerin boş kılıflarını temsil etmektedirler. Filamentlerin boş kılıfları, iğne benzeri kristallerle sınırlanmıştır (Şekil 9d). İkincil boşluklarda gelişen ve izopak saçaklar halinde bulunan sparitik Mg karbonatlar içerisindeki filamanetler kolaylıkla izlenebilmektedir (Şekil 9g ve h). Gözenek boşluğunda büyüyen asiküler ve yelpazeler halinde bulunan aragonit çapraz polarize ışıktaki opak kahverengidir. İyi gelişmiş lifsi aragonit yelpazeleri, organik madde açısından zengin zonlar içerisinde yaygındır (Şekil 9f, g ve h).



Şekil 8. Mikrobiyalitlerin (15 m su derinliği) üzerinde gelişen mikrobiyal katmanlarının XRD deseni.

Figure 8. XRD pattern of microbial layers of microbialite that grows at 15 m water depth.



Şekil 9. Stromatolitik trombolitlerin petrografik incelemesi. **a, b)** Filamentçe ve peloidçe zengin zon ve üzerleyen ince laminasyonlardan görüntüler. **c)** Organik matriks içinde yer alan filament ve sınırları boyunca gelişen karbonat kristalleri (beyaz ok). **d)** Organik matriks içinde gelişen karbonatların küme şeklinde birleşerek oluşturduğu pıhtı yapısı. **e)** Mikritik karbonat ve içindeki filament boşlukları. **f)** Boşluklarda gelişen lifsi aragonit yelpazeleri (kırmızı oklar). **g, h)** İzopak saçaklar halinde bulunan, radyal olarak büyüyen sulu Mg karbonatlar ve içindeki filamentler (kırmızı oklar). Tüm kesitler çapraz nikolde incelenmiştir.

Figure 9. Microbialites with internal stromatolitic and thrombolitic zones. **a, b)** Petrographic thin section photomicrographs of cyanobacterial filament- and peloid-rich zone overlain by laminations. **c)** At higher magnification, cyanobacterial filaments within clotted texture are visible and carbonates defining the filamentous sheaths. **d)** Clotted texture at higher magnification. **e)** Filament sheaths within micritic carbonates. **f)** Aragonite fans within the secondary porosity (red arrows). **g, h)** Development of carbonates isopachous fringes. All thin sections were examined under cross polarized-lights.

TARTIŞMA

Gölde Karbonat Çökelim Mekanizmaları

Gölün su toplama havzası ile kendisini besleyen yüzey ve yeraltı sularının (kaynaklar ve kuyular) farklı araştırmacılar tarafından yapılan jeokimyasal analizleri, Mg açısından zengin (ort., 396 mg/L), Ca (ort., 6,2 mg/L) içeriği düşük ve hafif alkali pH'ya sahip bir su jeokimyası ortaya koymaktadır (Varol; 2021; Balcı 2018; 2021; Güneş vd., 2024). Bu çalışma kapsamında, kaynakların ve

derelerin akış yolları boyunca, karbonat çökmesi gözlenmemiş ve kaynak sularının çıktığı yerlerde hava-su ara yüzeyinde karbonat oluşumları (örn., ince buz tabakası şeklinde) tespit edilmemiştir. Bu tespitler, kaynak suların karbonat mineralleri açısından doygunluğa ulaşmadığını önermektedir. Söz konusu sular için daha önceki çalışmalarda değişik karbonat mineralleri için hesaplanan doygunluk indeksleri (SI), göl suyunun hidromanyezitin yanı sıra dolomit, aragonit, kalsit, huntit ve manyezit gibi farklı Ca/Mg-

karbonat minerallerine göre doygunluğa ($SI > 1$) ulaştığını önermiştir (Balcı vd., 2021). Bu veriler, termodinamik olarak mineral oluşumlarının mümkün olduğuna işaret etmektedir. Buna karşın, yalnızca hidromanyezit ve aragonit mineralleri tespit edilmiştir. Düşük sıcaklık ve sulu ortamlarda, Mg kanyonlarının güçlü hidrasyonu nedeniyle, özellikle susuz Mg karbonat fazlarının çökmesi engellenir. Ancak, organik madde ve mikrobiyal yüzeyler bu kinetik inhibisyonu minimize ederek, sulu Mg karbonatların çökeline neden olurlar. Salda Gölü'nde sulu Mg karbonat çökelimlerinin mikrobiyal tabaka ile yakından ilişkisi bu jeokimyasal süreci desteklemektedir (Şekil 6 ve 9).

İncelenen mikrobiyal tabakaların ışık mikroskopu ve SEM görüntüleri, mikrokristalin bıçak veya tabaka şeklindeki Mg karbonat oluşumlarının (hidromanyezit ve dipinjit), HPM ve filament ile kokus şeklindeki bakterilerle olan yakın ilişkisini açıklıkla ortaya koymuştur (Şekil 6 ve 9). Dipinjit minerali ultramafik kayalarla kaplı alanların ayrışması sırasında salınan Mg iyonunun biyojenik etkilerle çökeltmesi sonucu oluşan sulu Mg karbonat mineralidir. Mikroorganizmalar, özellikle siyanobakteriler, Mg iyonunu hücre zarı etrafında biriktirerek, çökme için gerekli doygunluğu sağlayarak, mineral çökmesine neden olurlar (Shirokova vd., 2013). Dipinjit oluşumu için gerekli Mg iyonları Salda Gölü ve çevresini kaplayan serpantinleşmiş ultrabazik kayalardan sağlanmaktadır. Bu oluşum mekanizması, gölde ki mikrobiyal tabakalarla yakından ilişkili mineral çöklim zonları ile uyumludur (Şekil 6). Ayrıca, organik matriksin Mg ve Ca içermesi HPM'nin kimyasal özelliklerinin ve fonksiyonel gruplarının Mg ve Ca iyonları için etkili çekirdeklenme alanları sağlayarak, çökmeye neden olduğunu önermektedir (Balcı vd., 2020; Güneş vd., 2024; Baldes vd., 2025).

Mikrobiyal topluluk içindeki özellikle siyanobakterilerin salgıladığı HPM'nin mineral için çekirdeklenme alanları sağlamanın yanı sıra,

bikarbonat iyonlarını OH ve CO_2 'ye ayrıştırarak hücre etrafındaki mikro ortamlarda, pH artışına neden olarak Mg'nin çökmesini tetiklemektedir (Braissant vd., 2003).

15 metre su derinliğindeki mikrobiyal tabakanın ilk defa yapılan tür tanımlaması oksijenik fotosentetik mikroorganizmaların yanı sıra, örneğin Chloroflexi ve Firmiküs (örn., *Exiguobacterium*), γ -proteobacteria (*Pseudomonas* ve *Rheinheimera* cinsleri) gibi farklı mikroorganizmaları ortaya koyarak, mineral oluşum süreçlerinin düşünülen aksine daha dinamik bir jeomikrobiyolojik ortamda gerçekleştiğine işaret etmektedir (Şekil 7). Mikrobiyal topluluğun tamamını (L1-%95) veya önemli bir kısmını oluşturan heterotrofik mikroorganizmaların varlığı (örn. *Exiguobacterium*) oldukça dikkat çekicidir (Şekil 7). Ancak, bu aerobik heterotrofların rolü henüz tam olarak belirlenmemiştir. *Exiguobacterium* türleri mikrobiyal topluluk içerisinde yalnızca “kiracı” olarak bulunabilir ve çökme işlemine “yapıcı” olarak katılmayabilir. Yapıcılar, çökme reaksiyonlarına doğrudan dahil olan mikroorganizmalar olarak tanımlanır (Petryshyn vd., 2021). Yapıcıların rolleri, mikrobiyalit oluşturmak üzere metabolik işlevleri aracılığıyla karbonat çökmesini tetiklemek (örn. pH seviyesini arttırmak); sedimanların yakalanmasını ve bağlanmasını sağlamaktır. Dünyanın farklı bölgelerinde bulunan mikrobiyalitlerde siyanobakteri ve yeşil alg gibi oksijenik fotosentetikler, anoksijenik fotosentetikler, mor ve yeşil kükürt bakterileri; ile sülfat indirgeyen bakteriler gibi çeşitli yapıcılar tespit edilmiştir (Dupraz vd., 2009; Petryshyn vd., 2021). Salda Gölü'nde tespit edildiği gibi, kiracı mikrobiyal topluluklar, mineralizasyon sürecini doğrudan etkilememekle birlikte, mikrobiyal biyokütlenin büyük bir yüzdesini oluşturabilir.

Heterotrofların toplulukta “kiracı” olabileceği göz ardı edilmeksizin, aerobik heterotrofların Salda Gölü mikrobiyalitlerinin oluşumuna olası katkıları aşağıda tartışılmıştır.

Aerobik heterotroflar, oksijenik fotosentezin ürünü olan azot (N) bakımından zengin organik bileşikler sentezleyerek pH artışına katkıda bulunabilir; bu şekilde oksidatif deaminasyon (NH_4/NH_3) sistemi, sularda fotosentez kimyasına benzer pH koşulları yaratabilir (González-López vd., 2005; Balcı ve Demirel, 2018; Balcı vd., 2021; Güneş ve Balcı, 2021). Yapılan deneysel (Rivadeneira vd., 1999; 2004; Sanchez-Roman vd., 2011) ve saha çalışmaları (Gerard vd., 2013; 2018; Balcı ve Demirel, 2018; Sanz-Montero vd., 2019) ile heterotrofik mikroorganizmaların ortamın pH'sını değiştirerek, farklı karbonat minerali (örn., aragonit, hidromanyezit ve dolomit) oluşturdukları ortaya konmuştur. Aerobik heterotrofların göldeki mikrobiyalit oluşumundaki kesin rolü ve olası katkısı deneysel olarak test edilmektedir.

Gölde biyolojik etkilerle güncel olarak oluşan organo mineralizasyonun kapsamı, mikrobiyal çeşitlilik, HPM'nin kimyası, bozunması, sediman girdisi ve tane boyutları gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. Bu faktörlerin, göldeki mikrobiyalitlerin oluşumunu ve büyümesini nasıl ve ne ölçüde etkilediği konusunda bilgilerimiz giderek artmaktadır. Özellikle, akarsu birikintilerinin ve yeraltı suyu sızıntılarının bulunduğu gölün GB ve KD kısımlarında çok sayıda mikrobiyalit bulunması, bu faktörlerin göldeki mikrobiyalitlerin gelişimi üzerindeki etkisini vurgulamaktadır.

Salda Gölü Mikrobiyalitlerinin Biyoiz Potansiyeli ve Astrobiyolojik Önemleri

Özellikle son yirmi yıl içinde, uzay teknolojisindeki hızlı gelişmeler Yerküre dışındaki yaşam arayışı çalışmalarına ivme kazandırmıştır (Horgan vd., 2021; Balcı, 2022). Evrende yaşam barındıran bildiğimiz tek gezegen olan Yerküre bu çalışmaların ana rehberi olmuş; farklı jeolojik materyallerin biyoiz potansiyellerinin belirlenmesine yönelik çalışmalar öncelikli hale gelmiştir.

Salda Gölü, Mg karbonat oluşumlarına ev sahipliği yapan nadir jeolojik alanlardan biridir. Salda Gölü mikrobiyalitlerinin oluşumu, içerdiği biyolojik verinin ve biyoiz potansiyelinin ortaya konması, astrobiyoloji çalışmaları için kritiktir.

Göldeki mikrobiyalitler, stromatolitik trombolitlerden meydana gelmektedir. Bu mikrobiyalitlerin petrografik incelemeleri, siyanobakteri filamentlerinin sınırları boyunca oluşan mikrokristalleri ortaya koymuştur. Filamentlerin etrafında organikçe zengin zonlar içerisinde radyal şekilde kristallenen küresel SMK mineralleri ve oluşan pıhtı yapıları belirlenmiştir. Organikçe zengin zonlar üzerinde bulunan farklı boyuttaki peloidler dikkat çekici zonlardır. Bu çalışmada gözlenen pıhtılaşmış doku içerisindeki peloidçe zengin zonlar, mikrobiyal etkilerle oluşan karbonatlarda tanımlananlara yakından benzemektedir (Riding, 2000; 2006). Mikrobiyal topluluk tarafından oluşturulan bir biyofilm hem mikritik laminaların çökmesinden hem de peloidlerin depolanmasından sorumludur. Peloidçe zengin zonlar ve etrafındaki koyu laminalar, mikrobiyal topluluk, özellikle de filamentli siyanobakteriler tarafından bağlanma ve stabilizasyona işaret etmektedir (Şekil 9a ve b). Mikrobiyal etkilerle oluşan karbonatlarda, özellikle siyanobakteri etkisinde, yaygın olarak gözlemlenen bal peteği benzeri yapı, biyolojik karbonat oluşumlarında sıklıkla izlenmiştir (Şekil 6f). Bu yapı, HPM ve hücre çeperlerinin varlığında oluşan bir yapı olarak kabul görmüştür (Riding, 2000). Petrografik çalışma sonucunda ortaya konan, boşluklarda gelişen, lifsi ve fan şeklindeki aragonitler, inorganik bir kökene işaret etse de özellikle güncel mikrobiyal tabaka içinde tespit edilen ve diğer aragonit oluşumlarından farklı olarak nodüler şekilli aragonitler biyojenetik olabilir.

NASA'nın en son uzay misyonu kapsamında Mars'a gönderilen Azim "Perseverance" gezgin robotunun, Mars kraterlerinden biri olan Jezero'da

Mg içeren karbonatları keşfetmesi, biyoiz çalışmalarını hızlandırdı (Horgan vd., 2020).

Yerküre'deki jeolojik kayıtlarda ve güncel ortamlarda bulunan karbonatların, özellikle Ca içerenlerin, içerdikleri fosiller, izotop değerleri ve kimyasal bileşenleri nedeniyle iyi birer biyoiz potansiyeline sahip olduğu bilinmektedir (Allwood vd., 2006; Aloisi, 2008). Buna karşın, Mg karbonatlar ve Mg bakımından zengin karbonatlar hem geçmiş hem de güncel jeolojik kayıtlarda oldukça nadirdir. Bu göreceli az temsil gören karbonatların içerdikleri jeolojik ve biyolojik kayıtları deşifre etmek, Mars'taki yaşam arayışı için öncelikli hale gelmiştir.

SONUÇLAR

Salda Gölü mikrobiyalitleri üzerinde yapılan bu çalışmanın sonuçları kısaca aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- Gölde beş farklı zonda mikrobiyalit oluşumları tespit edilmiştir. Mikrobiyalitler özellikle Zon 2 ve Zon 3 bölgelerinde yoğunlaşmaktadır. Bu zonlar, Kocaçay ve Doğanbaba alüvyal deltaları içinde yer almakta olup, mikrobiyalit oluşumunu etkileyen çevresel faktörleri yansıtmaktadır.
- Gölde yürütülen detaylı sedimentolojik çalışmalar neticesinde üç ana mikrobiyalit türü tespit edilmiştir: Bunlar, stromatolitik, trombolitik ve stromatolitik-trombolitik türlerdir.
- Salda Gölü mikrobiyalitlerinin üst yüzeyi, kalın bir organik matriks içermektedir. Bu organik matriks, kısmen veya tamamen kalsifiye olmuş filamentli siyanobakteriler içermektedir.
- Salda gölü için tipik olan mikrobiyal katmanlara ait 16S rDNA analizleri, mikroskopik gözlemleri SMK'ların çökmesinin gerçekleştiği organik matriksin

içine gömülü değişken sayıda kokoid ve filamentli siyanobakteri, diyatom ve heterotrofik bakteri birlikteliğini göstermiştir. Bununla birlikte, organik matriks içindeki tüm filamentlerin kalsifiye olmadığı; diğer bir deyişle karbonat çökeline katılmadığı belirlenmiştir.

- Mikrobiyal tabakalar içinde ilk defa hidromanyezit mineralinin yanı sıra dipinjit isimli farklı bir sulu magnezyum karbonat minerali tespit edilmiştir. Bu bulgu, Salda Gölü'nde daha önce belgelenmemiş bir mineralojik çeşitliliğe işaret etmektedir.

EXTENDED SUMMARY

This study revealed new data regarding morphological, mineralogical and textural properties of Lake Salda microbialites (SW Türkiye). Within the scope of the study, for the first time, the microbialites were classified and mapped around the lake, identifying 5 different microbialite zones. In the lake, stromatolitic thrombolites are the most dominant microbialite type, while stromatolites and thrombolites only exist in the certain parts of the lake. Stromatolitic thrombolites have a wide variety of morphologies, exhibiting dome shapes, cauliflower-like shapes and rarely tabular forms. On a meso-scale (cm), stromatolitic thrombolites exhibit finger-shaped (2-5 cm) laminated mini-columns, and dendritic, and bulbous growth structures. Thrombolites with cauliflower-like macro morphology coalesce and form a large reef-like structure at 15 m water depth. The macro-scale external morphology of the microbialites forms primarily under the influence of the prevailing environmental conditions. A significant difference was observed between the shallow and deeper microbialites, which exemplifies the impact of environmental controls on microbialite morphology. Columnar-linked thrombolites exclusively form at depths of 10–20 meters, whereas dome-shaped thrombolites

with cauliflower-like morphology, stacked dome-shaped thrombolites, and stromatolitic thrombolites are the predominant morphotypes in shallower waters. In contrast to the shallow microbialites, the upper surfaces of deeper thrombolites are covered with well-developed, interconnected, finger-shaped mini columns, a few centimeters in size. These mini columns exhibit visible internal layering and grainy, non-layered structures. It is reasonable to assume that microbialites growing at depths greater than 10 meters are less influenced by seasonal water level fluctuations, evaporation, and wind/wave agitation. These stable conditions facilitate the development and preservation of thick microbial layers, which produce extracellular polymeric substances (EPS) that serve as nucleation sites for precipitation. The widespread presence of stalk-producing diatoms and the occurrence of hydromagnesite crystals within the EPS further support this interpretation.

Mineralogical study of the microbial layers growing at 15 m water depth revealed a different hydrated Mg carbonate mineral, dypingite ($\text{Mg}_5(\text{CO}_3)_4 \cdot \text{OH}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), for the first time. This mineral, closely related to extracellular polymeric matter (EPS), is likely the precursor of hydromagnesite. Petrographic investigations of the microbialites reveal an abundance of vertical and near-vertical filament-like structures (potentially mineralised) associated with carbonates exhibiting a clotted texture. These structures contain peloids of various sizes along with thin laminations. Nodular aragonite is commonly associated with microbial layers, while aragonite fibres forming in voids, as well as aragonite fans and isopach fringes resulting from their aggregation, indicate secondary and abiotic carbonate precipitation in the lake. Due to their structural, mineralogical, and compositional diversity, the microbialites of Lake Salda serve as a potential modern analogue for understanding the origin and formation processes of Mg-carbonates

in the geological record. Additionally, they may provide insights into the formation of hydrated Mg-carbonates detected in a possible palaeolake within Jezero Crater, one of Mars' ancient craters.

KATKI BELİRTME

Sunulan çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK, 113Y464) ve İTÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (BAP Projesi # MUA-2022- 43610, 47088 ve 46211) tarafından desteklenmiştir. Türkiye Cumhuriyeti Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'na L1-L4 örneklerinin elde edilmesindeki destekleri için teşekkür ederim. Yazar, bu çalışmanın geliştirilmesinde değerli katkılar sunan editör ve hakemlere teşekkür eder.

ORCID

Nurgül Balcı  <https://orcid.org/0000-0002-4772-2348>

KAYNAKLAR / REFERENCES

- Allwood, A. C., Walter, M. R., Kamber, B. S., Marshall, C. P. & Burch, I. W. (2006) Stromatolite reef from the Early Archaean era of Australia. *Nature*, 441, 714–718. <https://doi.org/10.1038/nature04764>
- Aloisi, G. (2008). The calcium carbonate saturation state in cyanobacterial mats throughout Earth's history. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(24), 6037–6060. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2008.10.007>
- Andersen, D.T., Sumner, D.Y., Hawes, I., Webster-Brown, J. & McKay, C.P. (2011). Discovery of large conical stromatolites in Lake Untersee, Antarctica. *Geobiology*, 9, 280–293. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4669.2011.00279.x>
- Arp, G., Reimer, A. & Reitner, J. (2001). Photosynthesis induced biofilm calcification and calcium concentrations in Phanerozoic oceans. *Science*, 292, 1701–1704.
- Arp, G., Reimer, A. & Reitner, J. (2003). Microbialite formation in seawater of increased alkalinity,

- Satonda Crater Lake, Indonesia. *Journal of Sedimentary Research* 73, 105–127. <https://doi.org/10.1306/071002730105>
- Awramik, S. M. & Buchheim, H. P. (2009). A giant, Late Archean lake system: The Meentheena Member (Tumbiana Formation, Fortescue Group), Western Australia. *Precambrian Research*, 174, 215–240. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2009.07.005>
- Awramik, S. M. & Margulhis, L. (1974) Definition of stromatolite, In E. Walter (Ed.), *Stromatolite Newsletter*, 2(5).
- Balcı, N. (2022) Mars Yolculuğunda Yeni Keşifler ve Biyoiz Bulmacası. *Herkese Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 324.
- Balcı, N. ve Demirel, C. (2018). Salda Gölü'nün jeomikrobiyolojisi ve güncel stromatolit oluşumunda mikrobiyal etkiler. *Hacettepe Üniversitesi, Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi Yerbilimleri Bülteni*, 39(1), 19-40. 2018.
- Balcı, N. & Güneş, Y. (2025). Tracking organomineralization from modern microbial layers of Lake Salda (hazırlık aşamasında).
- Balcı, N., Güneş, Y., Kaiser J., Ön, S. A., Eris, K., Garczynski, B. & Horgan, B. H. (2020). Biotic and abiotic imprints on Mg-Rich stromatolites: Lessons from Lake Salda, SW Turkey. *Geomicrobiology Journal*, 37, 401–425. <https://doi.org/10.1080/01490451.2019.1710784>
- Baldes, M. J. Gong, J., Trejo, D., Balcı, N., Güneş, Y., Tamura, N. & Bosak, T. (2025, inceleme de). Microbial polymers influence the mineralogy and organic preservation potential of hydrated magnesium carbonate minerals (İnceleme de).
- Braithwaite, C. J. R. & Zedef, V. (1994). Living hydromagnesite stromatolites from Turkey. *Sedimentary Geology*, 92, 1–5.
- Braithwaite, C. J. R. & Zedef, V. (1996). Hydromagnesite stromatolites and sediments in an alkaline lake, Salda Gölü, Turkey. *Journal of Sedimentary Research*, 66, 91–1002. <https://doi.org/10.1306/D426845F-2B26-11D7-8648000102C1865D>
- Brasier, A. T., Rogerson, M. R., Mercedes-Martin, R., Vonhof, H. B. & Reijmer, J. J. G. (2015). A test of the biogenicity criteria established for microfossils and stromatolites on Quaternary Tufa and Speleothem materials formed in the “Twilight Zone” at Caerwys, UK. *Astrobiology*, 15, 883–900. <https://doi.org/10.1089/ast.2015.1293>
- Brasier, A., Wacey, D., Rogerson, M., Guagliardo, P., Saunders, M., Kellner, S., Mercedes-Martin, R., Prior, T., Taylor, C., Matthews, A. & Reijmer, J. (2018). A microbial role in the construction of Mono Lake carbonate chimneys?. *Geobiology*, 16, 540–555. <https://doi.org/10.1111/gbi.12292>
- Braissant, O., Cailleau, G., Dupraz, C. & Verrecchia, E. P. (2003). Bacterially induced mineralization of calcium carbonate in terrestrial environments: the role of exopolysaccharides and amino acids. *Journal of Sedimentary Research*, 73, 485–490. <https://doi.org/10.1306/111302730485>
- Burne, R. V., Moore, L. S., Christy, A.G., Troitzsch, U., King, P.L., Carnerup, A. M. & Hamilton, P.J. (2014). Stevensite in the modern thrombolites of Lake Clifton, Western Australia: a missing link in microbialite mineralization?. *Geology*, 42, 575–578. <https://doi.org/10.1130/G35484.1>
- Chagas, A. P., Webb, G. E., Burne, R. V. & Southam, G. (2016). Modern lacustrine microbialites: Towards a synthesis of aqueous and carbonate geochemistry and mineralogy. *Earth-Science Reviews*, 162, 338–363. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.09.012>
- Corsetti, F. A. & Storrie-Lombardi, M.C. (2003). Lossless compression of stromatolite images: a biogenicity index?. *Astrobiology*, 3, 649–655. <https://doi.org/10.1089/153110703322735980>
- De Boever, E., Foubert, A., Lopez, B., Swennen, R., Jaworowski, C., Özkul, M. & Virgone, A. (2017a). Comparative study of the Pleistocene Cakmak quarry (Denizli Basin, Turkey) and modern Mammoth Hot Springs deposits (Yellowstone National Park, USA). *Quaternary International*, 437, 129–146. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2016.09.011>

- De Boever, E., Brasier, A.T., Foubert, A. ve Kele, S. (2017b). What do we really know about early diagenesis of non-marine carbonates?. *Sedimentary Geology*, 361, 25–51. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2017.09.011>
- Dupraz, C., Reid, R. P., Braissant, O., Decho, A. W., Norman, R. S. & Visscher, P. T. (2009). Processes of carbonate precipitation in modern microbial mats. *Earth-Science Reviews*, 96, 141–162. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2008.10.005>
- Ferris, F. G., Thompson, J. B. & Beveridge, T. J. (1997). Modern freshwater microbialites from Kelly Lake, British Columbia, Canada. *Palaaios*, 12, 213–219. <https://doi.org/10.2307/3515423>
- Frantz, C. M. (2015) They might be giants: colossal lacustrine stromatolites. *Geology*, 43 (8), 751–752. <https://doi.org/10.1130/focus082015.1>
- Garczynski, B. J., Horgan, B., Kah, L. C., Balcı, N. & Güneş, Y. (2019). Searching for potential biosignatures in Jezero Crater with Mars 2020. A spectral investigation of terrestrial lacustrine carbonate analogs. *Lunar Planetary Contributions*, 2089.
- Garczynski, B. J., Horgan, B., Kah, L.C., Balcı, N., Güneş, Y., Williford, K. H. & Cloutis, E. A. (2020) Investigating the origin of carbonate deposits in Jezero Crater: Mineralogy of a fluviolacustrine analog at Lake Salda, Turkey. *Lunar Planetary Contributions*, 2326, 2128.
- Gérard, E., Ménez, B., Couradeau, E., Moreira, D., Benzerara, K., Tavera, R. & López-García, P. (2013). Specific carbonate–microbe interactions in the modern microbialites of Lake Alchichica (Mexico). *The ISME Journal*, 7, 1997–2009. <https://doi.org/10.1038/ismej.2013.81>
- Ginsburg, R.N. (1991). Controversies about stromatolites: vices and virtues. In D. W. Müller, J. A. McKenzie, & H. Weissert (Eds.), *Controversies in Modern Geology, London, UK, Harcourt Brace Jovanovich (Academic Press)*, 25–36.
- González-López, J., Rodelas, B., Pozo, C., Salmerón-López, V., Martínez-Toledo, M. V. & Salmerón, V. (2005). Liberation of amino acids by heterotrophic nitrogen fixing bacteria. *Amino Acids*, 28(4), 363–7.
- Gomez, F. J., Kah, L. C., Bartley, J. K. & Astini, R. A. (2014). Microbialites in a high- altitude Andean lake: Multiple controls on carbonate precipitation and lamina accretion. *Palaaios*, 29, 233–249.
- Grotzinger, J. P. & Knoll, A. H. (1999) Stromatolites in Precambrian carbonates: evolutionary mileposts or environmental dipsticks?. *Annual Review of Earth Planetary Sciences*, 27, 313–358. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.27.1.313>
- Grotzinger, J. P. & Rothman, D. H. (1996). An abiotic model for stromatolite morphogenesis. *Nature*, 383, 423–425. <https://doi.org/10.1038/383423a0>
- Güneş, Y. & Balcı, N. (2021). The Catalytic Effect of the Heterotrophic Bacterium *Virgibacillus marismortui* on Basaltic Rock Dissolution Under Excess Nutrient Conditions, *Geomicrobiology Journal*, 38, 4, 315-328. <https://doi.org/10.1080/01490451.2020.1852453>
- Güneş, Y., Baldes, M. J., Gong, J., Bosak, T. & Balcı, N. (2022) Morphospace, composition and texture of Lake Salda microbialites. EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria, 23–27 May 2022, *EGU22-395*.
- Güneş, Y., Sekerci, F., Avcı, B., Ettema, T. & Balcı, N. (2024). Morphological and Microbial Diversity of Hydromagnesite Microbialites in Lake Salda: A Mars Analog Alkaline Lake. *Geobiology*, 22, Article e12619. <https://doi.org/10.1111/gbi.12619>
- Horgan, B., Anderson, R., Dromart, G., Amador, E. & Rice, M. (2020) The mineral diversity of Jezero crater: Evidence for possible lacustrine carbonates. *Icarus*, 339, Article113526.
- Kazancı, N., Girgin, S. & Dügel, M. (2004). On the limnology of Salda Lake, a large and deep soda lake in southwestern Turkey: future management proposals, aquatic conservation. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 14(2), 151–162. <https://doi.org/10.1002/aqc.609>

- Kempe, S. & Kaźmierczak, J. (1993). Satonda Crater Lake, Indonesia: Hydrogeochemistry and bicarbonates. *Facies*, 28, 1–31.
- Meister, P. (2013) Two opposing effects of sulfate reduction on calcite and dolomite precipitation in marine, hypersaline and alkaline environments. *Geology*, 41, 499–502. <https://doi.org/10.1130/G34639C.1>
- Meister, P. (2014) Two opposing effects of sulfate reduction on carbonate precipitation in normal marine, hypersaline, and alkaline environments: REPLY. *Geology*, 42, 315. <https://doi.org/10.1130/G35240Y.1>
- Petryshyn V. A., Junkins E. N., Stamps B. W., Bailey J. V., Stevenson, B. S., Spear J. R. & Corsetti F. A. (2021). Builders, tenants, and squatters: The origins of genetic material in modern stromatolites. *Geobiology*, 19, 261–277. <https://doi.org/10.1111/gbi.12429>
- Reid, R. P., Macintyre, I. G., Browne, K. M., Steneck, R. S. & Miller, T. (1995) Modern marine stromatolites in the Exuma Cays, Bahamas: uncommonly common. *Facies*, 33, 1–18. <https://doi.org/10.1007/BF02537442>
- Riding, R. (2006) Cyanobacterial calcification, carbon dioxide concentrating mechanisms, and Proterozoic-Cambrian changes in atmospheric composition. *Geobiology*, 4, 299–316. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4669.2006.00087.x>
- Riding, R. (2000). Microbial carbonates: the geological record of calcified bacterial-algal mats and biofilms. *Sedimentology*, 27, 179–214. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3091.2000.00003.x>
- Rivadeneira, M. A., Paraga, J., Delgado, G., Ramos-Coemenzana, A. & Delgado, G. (2004). Biomineralization of carbonates by *Halobacillus trueperi* in solid and liquid media with different salinities. *FEMS Microbiol Ecology*, 48, 39–46. <https://doi.org/10.1016/j.femsec.2003.12.008>
- Rivadeneira, M-A., Delgado, G., Soriano, M., Ramos-Cormenzana, A. & Delgado, R. (1999). Biomineralization of carbonates by *Marinococcus albus* and *Marinococcus halophilus* isolated from Salar de Atacame (Chili). *Current Microbiology*, 39, 53–57. <https://doi.org/10.1007/PL00006827>
- Russell, M. J., Ingham, J.K., Zedef, V., Maktav, D., Sunar, F., Hall, A. J. & Fallick, A.E. (1999). Search for signs of ancient life on Mars: Expectations from hydromagnesite microbialites, Salda Lake, Turkey. *Journal of the Geological Society*, 156, 869–888. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.156.5.0869>
- Sánchez-Román, M., Romanek, C.S., Fernández-Remolar, D. C., Sánchez-Navas, A., McKenzie, J. A., Pibernat, R. A. & Váscnellos, C. (2011). Aerobic biomineralization of Mg-rich carbonates: Implications for natural environments. *Chemical Geology*, 281, 143–150. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2010.11.020>
- Sanz-Montero, M. E., Cabestrero, O. & Sánchez-Román, M. (2019). Microbial Mg-rich Carbonates in an Extreme Alkaline Lake (Las Eras, Central Spain) *Frontiers in Microbiology*, 10, 148. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00148>
- Şenel, M., Akyürek, B., Can, N., Aksay, A., Pehlivan, N., Bulut, V. ve Aydal, N. (1997). *1:100.000 ölçekli Türkiye Jeoloji Haritası, Denizli M23 (J9)*. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Yayını, Ankara.
- Schmid, H. (1987). Turkey's Salda Lake: A genetic model for Australia's newly discovered magnesite deposits. *Industrial Minerals*, 239, 19–31.
- Schopf, J. W. (2006). Fossil evidence of Archaean life. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 361, 869–885. <https://doi.org/10.1098/rstb.2006.1834>
- Shirokova, L.S., Mavromatis, V., Bundeleva, I.A., Pokrovsky, O. S., Bénézeth, P., Gérard, E., Pearce, C. R. & Oelkers, E. H. (2013). Using Mg Isotopes to Trace Cyanobacterially Mediated Magnesium Carbonate Precipitation in Alkaline Lakes. *Aquatic Geochemistry* 19, 1–24. <https://doi.org/10.1007/s10498-012-9174-3>
- Van Kranendonk, M. J., Philipot, P., Lepot, K., Bodorkos, S. & Pirajno, F. (2008) Geological setting of Earth's oldest fossils in the ca. 3.5

- Ga Dresser Formation, Pilbara Craton, Western Australia. *Precambrian Research*, 167, 93–124. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2008.07.003>
- Varol, S., Davraz, A., Şener, Ş., Şener, E., Aksever, F., Kırkan, B. & Tokgözlü, A. (2021). Assessment of groundwater quality and usability of Salda Lake Basin (Burdur/Turkey) and health risk related to arsenic pollution. *Journal of Environmental Health Science. Engineering*, 19, 681–706. <https://doi.org/10.1007/s40201-021-00638-5>
- Wacey, D., Kilburn, M. R., Saunders, M., Cliff, J. & Brasier, M. D. (2011). Microfossils of sulphur-metabolizing cells in ~3.4 billion-year-old rocks of Western Australia. *Nature Geosciences*, 4, 698–70. <https://doi.org/10.1038/ngeo1238>